

Heiner Drenhaus, Peter beim Graben

Ereigniskorrelierte Potenziale (EKPs)

Abstract: In this article we give a short introduction to the online method of event-related (brain) potentials (ERPs) and their importance for our understanding of language structure and grammar. This methodology places high demands on (technical) requirements for laboratory equipment as well as on the skills of the investigator. However, the high costs are relatively balanced compared to the advantages of this experimental method. By using ERPs, it becomes possible to monitor the electrophysiological brain activity associated with speech processing in real time (millisecond by millisecond) and to draw conclusions on human language processing and the human parser.

First, we present briefly how this method works and how ERPs can be classified (Section 1 and 2). In the following, we show that the ERP method can be used to study the processing of e.g. semantic, pragmatic and syntactic information (Section 3). Crucial for our discussion will be the interpretation of the so-called ERP components and their connection and importance for psycholinguistics and theoretical linguistics. In our presentation, we emphasize, that the electrophysiological brain activity in relation to specific (e.g. linguistic) stimuli can be used to identify distinct processes, which give a deeper insight into the different processing steps of language. At the end of this article (Section 4), we present some results from ERP studies of German negative-polar elements. Additionally, we highlight the advantage and benefits of an alternative method to analyze ERP data compared to the more ‘classical’ average technique.

Heiner Drenhaus: Psycholinguistik, Institut für Computerlinguistik und Phonetik, Universität des Saarlandes, D-66123 Saarland, E-Mail: drenhaus@coli.uni-saarland.de

Peter beim Graben: Institut für Deutsche Sprache und Linguistik und Bernstein Center for Computational Neuroscience, Humboldt-Universität zu Berlin, Unter den Linden 6, D-10099 Berlin, E-Mail: peter.beim.graben@hu-berlin.de

- 1 Grundlagen der EEG/EKP-Methodik
- 2 Komponentenklassifikation
- 3 EKPs und was sie uns über Sprache sagen können
 - 3.1 Die N400 oder der ‚N400 Komplex‘
 - 3.1.1 Einzelsatzverarbeitung
 - 3.1.2 Einfluss von Kontextinformation
 - 3.2 Morphosyntaktische Prozesse ((E)LAN, LAN und die P600)
 - 3.3 Semantische/pragmatische Prozesse P600 und P3b

- 4 Einige EKP-Ergebnisse zu negativ polaren Elementen
- 5 Fazit
- Danksagung
- Literatur

1 Grundlagen der EEG/EKP-Methodik

Im Jahre 1929 veröffentlichte der Psychiater Hans Berger die erste Arbeit über die Methode der Elektroenzephalographie beim Menschen (Berger, 1929). Er entdeckte, dass sich zwischen zwei Elektroden, die an der Kopfoberfläche angebracht werden, regelmäßige Potenzialschwankungen ableiten lassen, und fragte:

Ist es möglich, den Einfluß intellektueller Arbeit auf das menschliche Elektrenkephalogramm, [...], nachzuweisen? (Berger, 1929, S. 569)

Diese Frage wurde zum Ausgangspunkt eines umfassenden Forschungsprogramms, welches die unterschiedlichsten neuronalen Korrelate mentaler und kognitiver Prozesse aufzeigte, und das im Rahmen der Erforschung ereigniskorrelierter Hirnpotentiale (EKP) für die Kognitionspsychologie und Psycho- und Neurolinguistik zentral ist.

Die Ableitung von Potenzialschwankungen der Großhirnrinde wird als Elektroenzephalogramm (EEG) bezeichnet und findet sowohl in der Forschung als auch in der klinischen Diagnostik Anwendung (zur Diagnose von Erregungsstörungen wie Epilepsie, Bewusstseinsstörungen oder entzündlichen bzw. degenerativen Hirnerkrankungen). Die Veränderungen in der Frequenz, also die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde gemessen in Hertz (Hz), stehen mit dem Auftreten von mentalen Aktivitäten wie z.B. Aufmerksamkeitszuständen in Wechselbeziehung. Es lassen sich hierbei vier Haupttypen von Frequenzbändern unterscheiden. Die sogenannten α -Wellen (8–13 Hz) lassen sich nachweisen, wenn sich eine Person in einem entspannten Wachzustand befindet. Präsentiert man dieser Person nun einen unerwarteten Reiz, verändert sich das Wellenmuster hin zu einer Frequenz von 14–30 Hz (β -Wellen). Ebenso lassen sich langsamere Wellenmuster nachweisen, wenn sich eine Person in einem dösen Wachzustand (5–7 Hz; θ -Wellen) oder im Tiefschlaf oder Koma befindet (0,5–4 Hz; δ -Wellen).

Neben diesen Wechselbeziehungen von mentalen Zuständen und Frequenzen im EEG zur Untersuchung der Spontan- bzw. Grundaktivität des Gehirns (vgl. z. B. Herrmann, Grigutsch & Busch, 2005) hat sich noch eine andere Methode der EEG-Auswertung durchgesetzt, die sogenannten ereigniskorrelierten (Hirn-)Potenziale (EKP; im Englischen: *event-related potentials*; ERP). Diese Auswertemethodik ist gerade für die Untersuchung der Sprachverarbeitung relevant und hat – wie wir im Weiteren sehen werden (Abschnitte 3 und 4) – interessante

Einblicke in den menschlichen ‚Sprachverarbeitungsapparat‘ bzw. in die Mechanismen der Sprachverarbeitung geliefert.

Wie oben erwähnt, werden bei der Elektroenzephalographie (EEG-Messung), mittels über den Kopf verteilter Elektroden, Spannungsveränderungen des Gehirns auf der Schädeloberfläche abgeleitet. Genauer gesagt, wird hierbei die Spannungsdifferenz zwischen Elektroden auf der Kopfoberfläche und einer oder mehreren Referenzelektroden gemessen. Die neuronalen Generatoren der im EEG aufgezeichneten Potenzialschwankungen (Hirnströme) sind Module aus einigen 10.000 kortikalen Pyramidenzellen, die im Gleichtakt schwingen. Erregende (exzitatorische) und hemmende (inhibitorische) Synapsen sind bei diesen Nervenzellen räumlich weit voneinander getrennt, so dass die Pyramidenzellen Stromdipole bilden, deren Potenziale sich zum messbaren EEG-Signal überlagern (Zschocke, 2002; s. auch beim Graben et al., 2012).

Will man das EEG-Signal messen, muss es während der Aufnahme verstärkt werden, da die Spannungsdifferenzen nur sehr schwach sind (zwischen 50 bis 150 Mikrovolt (μV)). Das kontinuierliche Spontan-EEG (fortlaufende Hirnaktivität) wird dann digitalisiert. Die Anzahl der Datenpunkte pro Sekunde wird in Hertz gemessen und repräsentiert die Abtast- bzw. Sampling-Rate. Wichtig für die Auswertung der aufgenommenen Daten ist, dass nicht alle gemessenen Aktivitäten in die Analyse eingehen, weil nicht alle neuronalen Prozesse auf eine (experimentelle) Manipulation zurückzuführen sind. So können z. B. Augenbewegungen wie Blinzeln, Muskelbewegungen oder Bewegung der Elektrodenkabel etc. starke Auswirkungen auf das EEG-Signal haben und zu Artefakten führen, die dann in der weiteren Verarbeitung der Rohdaten ausgeschlossen werden müssen. Für eine finale Auswertung sollten nur artefaktfreie Messabschnitte (Untersuchungstrials) eingehen.

Im Unterschied zur Spontanaktivität des Gehirns (EEG) sind ereigniskorrelierte Potenziale (EKPs) an exakt in der Zeit festgelegte Ereignisse gebunden. Die Annahme ist hierbei, dass Veränderungen im Signal in ähnlichen zeitlichen Abständen (Millisekunden) und ähnlicher Ausprägung (Polarität, Topographie, Morphologie) zu einem bestimmten Ereignis (nach der Darbietung eines Wortes, eines Lautes oder z. B. einer syntaktischen Verletzung etc.) auftreten.

Um aus dem EEG das EKP auszulesen, wird das gesampelte Spontan-EEG in einem ersten Schritt hinsichtlich der experimentellen Reize „epochiert“. Dadurch entsteht eine Stichprobe von EKP-Trials. Um sicherzustellen, dass keine systematischen Unterschiede zwischen experimentellen Bedingungen entstehen, werden diese Trials auf eine gemeinsame Grundlinie (*Baseline*; üblicherweise eine kurze Zeitspanne vor Erscheinen des Stimulus) ausgerichtet. Der Grund hierfür ist, dass solche Unterschiede Einfluss auf den Zeitbereich der eigentlichen experimentellen Manipulation ausüben. Es sollte also bei der Planung von EKP-Experimenten

darauf geachtet werden, dass z. B. das Wort, welches vor dem zu untersuchenden Zeitbereich präsentiert wird, möglichst über alle Bedingungen gleich ist.

Ein generelles Problem, mit dem man konfrontiert ist, wenn man EKPs im EEG ermitteln möchte, ist die ‚unsystematische‘ Spontanaktivität (Grundrauschen) des Gehirns, welche das zu ermittelnde, ereigniskorrelierte Signal stark überlagert. Um nun das systematische EKP-Signal aus dem Grundrauschen herauszulösen, wird die Mittelungstechnik verwendet. Diese beruht auf der Annahme, dass das Rauschen zufällig verteilt ist und bei der Mittelung über viele Trials hinweg minimiert werden kann. Im Gegensatz hierzu sollte das EKP-Signal bei der Mittelung über mehrere relevante Zeitabschnitte erhalten bleiben und somit das Rauschen unterdrückt werden. Die Konsequenz für die Durchführung eines EKP-Experimentes ist dann, dass die Anzahl der in die Auswertung eingehenden, ereigniskorrelierten Bereiche hoch sein muss, um Spontanaktivität zu minimieren (Signal-Rauschverhältnis). So haben sich z. B. in EKP-Experimenten zur Satzverarbeitung eine Anzahl von ca. 30 bis 40 Trials pro experimenteller Manipulation bei einer Stichprobe von 16 bis 20 Probanden bewährt (vgl. z. B. Hahne, 1998; Frisch, 2000; Luck, 2004, 2005).

Neben der ‚klassischen‘ Mittelungstechnik haben sich auch noch andere Methoden etabliert, um das Signal-Rauschverhältnis zu verbessern und um Ereignis-induzierte Aktivität von Ereignis-evozierter Aktivität zu trennen. Hier sind zum Beispiel die *Independent Component Analysis* (ICA: Jung et al., 2000; Makeig et al., 1997), das sogenannte *Wavelet-Denoising* (Quiroga & Garcia, 2003), Zeit-Frequenz-Analysen (Makeig et al., 2004; Roehm et al., 2004; Herrmann, Grigutsch & Busch, 2005; Bastiaansen & Hagoort, 2006), oder die Symbolische Resonanz-Analyse (*Symbolic Resonance Analysis*, SRA: beim Graben et al., 2005; Frisch & beim Graben, 2005; beim Graben et al., 2007) zu nennen. Weil wir im Abschnitt 4 Ergebnisse der SRA vorstellen werden, sei letztere hier kurz erläutert.

Zur digitalen Verarbeitung ereigniskorrelierter Potenziale müssen sowohl der Zeitverlauf als auch der Wertebereich des EEG diskretisiert werden. Die Signaldiskretisierung hängt von der Amplitude des EEG (also etwa 50–150 μV) und vom verwendeten Computersystem (in der Regel 16–64 Bit) ab. Mit einem 16-Bit-System lassen sich z.B. $2^{16} = 65536$ verschiedene Spannungswerte unterscheiden. Diese begrenzte Auflösungsgenauigkeit von Digitalcomputern erscheint üblicherweise als Nachteil. Allerdings werden in der nichtlinearen Datenanalyse häufig Symbolisierungsverfahren eingesetzt, die eine weitaus geringere Auflösung haben. Mit einer Auflösung von einem Bit lassen sich lediglich 2 Spannungswerte, z. B. positiv und negativ, unterscheiden. Dieses Verfahren ist von beim Graben et al., (2000) in die EKP-Analyse eingeführt worden. Bei der Symbolischen Resonanz-Analyse wird das Roh-EEG in drei Wertebereiche partitioniert: für einen vorgegebenen (positiven) Schwellenwert in 1. überschwellige

Ereignisse positiver Polarität (positiv-überschwellige Ereignisse), 2. unterschwellige Ereignisse und 3. Ereignisse, bei denen die Schwelle in negativer Richtung überschritten wird (negativ-überschwellige Ereignisse). Zählt man nun die Häufigkeiten von EKP-Trials in der Stichprobe aus, gelangt man zu einer neuen Definition von EKP-Komponenten als „Resonanzen“: Eine positive Komponente weist mehr positiv-überschwellige Ereignisse als unterschwellige Ereignisse und mehr unterschwellige Ereignisse als negativ-überschwellige Ereignisse auf. In gleicher Weise weist eine negative Komponente mehr negativ-überschwellige Ereignisse als unterschwellige Ereignisse und mehr unterschwellige Ereignisse als positiv-überschwellige Ereignisse auf. Ereignisse, die in keine dieser beiden Klassen fallen, werden statistisch als Gleichverteilungen von positiven und negativen Auslenkungen aufgefasst. Mit diesem Ansatz konnten beim Graben et al. (2005); Frisch & beim Graben (2005) und beim Graben et al. (2007) das Signal-Rausch-Verhältnis ereigniskorrelierter Potenziale steigern und überlagerte EKPs auflösen.

Die so erhaltenen Messwerte werden dann weiterverarbeitet und grafisch dargestellt. Zunächst werden die Daten pro Proband, pro experimenteller Bedingung und pro Elektrode gemittelt. Danach erfolgt eine Mittelung über alle Probanden pro experimenteller Manipulation (Bedingung) und pro Elektrode. Nun ist es möglich, z. B. die Amplitudenwerte für einen relevanten Zeitabschnitt für eine statistische Auswertung zu nutzen.¹ Ebenso können auch topografische Faktoren in die statistische Auswertung einbezogen werden, indem nicht nur über Einzelelektroden sondern auch über Verbände benachbarter Elektroden (*Regions Of Interest*) gemittelt wird.² Schließlich können EKPs im Rahmen einer statistischen Modellierung mit behavioralen Daten oder Ergebnissen aus computationalen oder neuronalen Simulationen korreliert werden (Gries, 2012). Ein Beispiel für Letzteres findet sich bei beim Graben et al. (2012). Weitere ausführliche Informationen bezüglich der EEG- bzw. EKP-Methodik finden sich z. B. in Coles & Rugg (1995); Luck (2004, 2005) und Picton et al. (2000).

¹ Gries (2012) – in diesem Band – präsentiert eine detaillierte Darstellung der Aspekte der statistischen Modellierung. Hier wird gerade die Relevanz neuerer statistischer Modelle/Methoden (linear mixed models (LMMs) Bates and Sarkar (2007)) im Vergleich zur ‚klassischen‘ Anova verdeutlicht (vgl. auch Baayen, 2008).

² In Drenhaus et al. (2011) und Vasisht & Drenhaus (2011) werden ‚linear mixed models (LMMs)‘ (Bates and Sarkar, 2007) auf EKP-Daten angewendet (vgl. auch Gries (2012) in diesem Band zur statistischen Modellierung).

2 Komponentenklassifikation

Nachdem in Abschnitt 1 einige grundlegende Prinzipien der EEG/EKP-Methodik erläutert worden sind, wird in diesem Abschnitt betrachtet, welche Informationen man aus den bearbeiteten Rohdaten erhalten kann. Zentral hierbei ist, dass EKPs unterschiedliche Informationen liefern und sich nach unterschiedlichen Kriterien zusammenfassen lassen. Es geht hierbei um die sogenannten EKP-Komponenten (Donchin et al., 1978).

Abbildung 1 zeigt einige der relevanten Merkmale ereigniskorrelierter Potenziale: Polarität, Latenz, Topographie und Amplitude. Zum Einen kann der Verlauf (Auslenkung) der Kurven nach ihrer Polarität (positiv und negativ) beschrieben werden. Hierbei ist zu beachten, dass EKPs, die aufgrund einer experimentellen Manipulation ermittelt wurden, nicht als ein absolutes Maß verstanden werden dürfen. Es ist vielmehr so, dass diese relativ zu einer experimentellen Vergleichsbedingung interpretiert werden. Das Beispiel (Abbildung 1) zeigt EKPs aus einem Experiment, welches die Integration von Wörtern in den Satzkontext untersucht (in Anlehnung an eine Studie zum Englischen von Kutas & Hillyard, 1980). Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Bedingungen, wenn ein nicht-erwartetes Wort (hier *Steine*, gepunktete Linie) im Vergleich zu einem

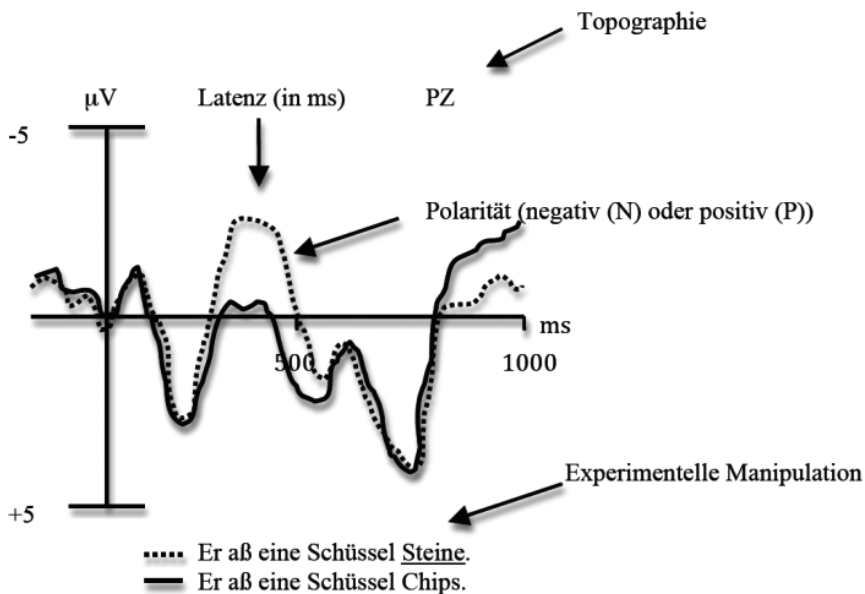


Abbildung 1: Klassifikation der EKPs auf dem Nomen ‚Steine‘ versus ‚Chips‘ (schematisch)-Negativität ist nach oben abgetragen

erwarteten Wort (*Chips*, durchgezogene Linie) in den Satzkontext integriert wird. Die Auslenkung der gepunkteten Kurve ist negativer als die der semantisch sinnvollen Vergleichsbedingung (Polarität). Des Weiteren kann man erkennen, in welchem Zeitfenster sich die beiden Bedingungen unterscheiden (Latenz). Hier liegt der Zeitpunkt, an dem sich die beiden Bedingungen am deutlichsten unterscheiden, um ca. 400 ms nach der Präsentation des Wortes *Steine* bzw. *Chips*. Diese Negativierung wird in der Literatur als N400 bezeichnet und im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben.

Eine weitere Klassifikation von EKP-Komponenten ist die Position (Elektrode/n) auf der Schädeloberfläche an der ein Effekt auftritt (Topographie). Abbildung 1 zeigt die EKPs auf der Elektrode PZ, die in der zentral-posterioren Region angebracht wird (Abbildung 2). Ebenso ist die Ausprägung eines EKP-Effekts (Amplitude) von Bedeutung, da hiermit Aussagen über quantitative Unterschiede zwischen kognitiven Prozessen gegeben werden können (Vgl. Abschnitte 3 und 4).

Durch die drei Merkmale Latenz, Topographie und Polarität lassen sich EKP-Komponenten klassifizieren. Topographische Informationen sind relevant, da unterschiedliche räumliche Ausprägungen eines Effektes auf eine unterschiedliche neuronale Aktivität schließen lassen. Generell lassen sich aufgrund divergierender (neuronaler) Muster (Amplitude, Latenz, Topographie und Polarität) auf unterschiedliche kognitive Prozesse schließen (vgl. z. B. Coles & Rugg, 1995; Picton et al., 2000).

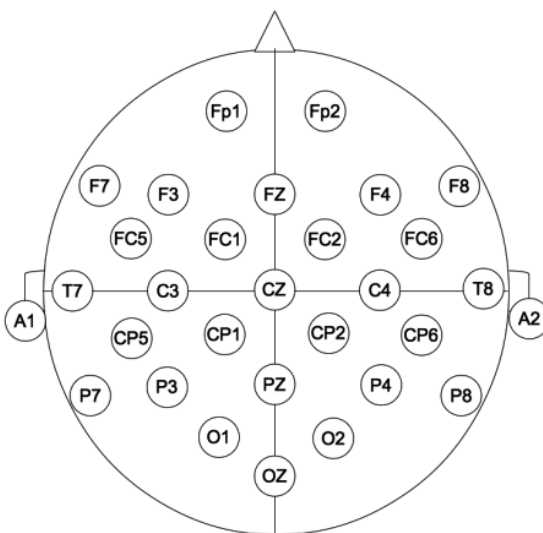


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Elektrodenpositionen (10/20-System) nach Sharbrough et al. (1995)

Ein Vorteil der EKP-Methode ist, dass sie eine nicht-invasive Methode darstellt, die eine Messung kognitiver Prozesse erlaubt. Ein weiterer Vorteil ist, dass dies mit einer hohen zeitlichen Auflösung im Millisekundenbereich erfolgt. Es ist also möglich, das Gehirn bei der Arbeit zu beobachten, oder genauer *auf das Gehirn bei der Arbeit* zu schauen. Die EKP-Methodik ist an die neurophysikalischen Grundlagen unseres Gehirns gebunden (beim Graben et al., 2012). Es können also nicht nur quantitative Unterschiede wie bei einer Reaktionszeitmessung, sondern gerade qualitative Unterschiede kognitiver Prozesse durch die Latenz, Topographie, Polarität und Amplitude sichtbar gemacht werden. Hierdurch ist es möglich, einzelne Ebenen der Sprachverarbeitung zu untersuchen und die erhaltenen Ergebnisse im EKP diesen Ebenen zuzuordnen und hiernach zu klassifizieren. Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass eine Komponente nicht nur einen einzelnen neuronalen Aktivierungszustand bzw. spezifischen kognitiven Prozess widerspiegelt. Die Annahme spezifischer Komponenten ist eher methodischer Natur. Der Verlauf einer spezifischen EKP-Kurve kann theoretisch durch eine unendliche Anzahl unterschiedlicher und sich überlagernder Dipole entstehen (Helmholtz, 1853). Dies hat zur Folge, dass es zwar möglich ist, EKPs bezüglich ihrer Latenz, Topographie und Amplitude in Relation zu experimentellen Manipulationen zu klassifizieren, dass es aber nicht möglich ist, die einzelnen neuronalen Generatoren die einen Effekt induzieren, direkt zu lokalisieren (Inverses Problem). Ebenso ist die Aktivität, die im EEG gemessen wird, sensibel für die Ausrichtung der Generatoren, die im Idealfall senkrecht zur Schädeloberfläche angeordnet sind. Je nach Ausrichtung der Dipole kann eine graduelle abgestufte Bedeutung der Neuronenausrichtung für das EEG Signal nachgewiesen werden (Schomer et al., 2011). Aufgrund der Faltung und Furchung des Kortex erzeugen Neuronenverbände, die parallel zur Schädeloberfläche ausgerichtet sind, elektrische Felder, die nicht im EEG, wohl aber im Magnetoenzephalogramm (MEG) messbar sind.

3 EKPs und was sie uns über Sprache sagen können

In diesem Abschnitt sollen nun verschiedene EKP-Komponenten und ihr Bezug zur Sprachverarbeitung anhand von Studien diskutiert werden. Es kann hier – aus Platzgründen – natürlich nur ein kleiner Ausschnitt bzw. ein grober Überblick über Studien gegeben werden, die relevant für die Verarbeitung von semantischen, pragmatischen und morpho-syntaktischen Phänomenen sind.³

³ Der Bereich der Phonologie bzw. Phonetik wird hierbei ausgeblendet bzw. nur in für die Darstellung relevanten Bereichen gestreift.

Zunächst werden Ergebnisse zur bereits erwähnten N400 dargestellt, die häufig mit semantischen Verarbeitungspänomenen in Verbindung gebracht wird. Es ist allerdings wichtig zu beachten, dass die N400 nicht ausschließlich ein Marker für semantische Anomalien oder semantische Verletzungen ist, sondern auch in Studien zur pragmatischen Verarbeitung gefunden wird. Im Anschluss wird ein weiterer Komponentenkomplex betrachtet. Es handelt sich hierbei um Positivierungen, die in der Literatur als P600 aber auch unter der Bezeichnung P300 diskutiert wurden. Andere Komponenten, die mit der P600 in Verbindung stehen, wie z. B. die LAN (*Left Anterior Negativity*, Links-frontale Negativierung) und die ELAN (*Early Left Anterior Negativity*, Frühe Links-frontale Negativierung) werden nur kurz anhand von grundlegenden Arbeiten eingeführt (für eine ausführliche Darstellung und Diskussion vgl. z. B. Kutas, Van Petten & Kluender, 2006; Kutas & Federmeier, 2009).

3.1 Die N400 oder der ‚N400 Komplex‘

3.1.1 Einzelsatzverarbeitung

Diese Komponente, deren höchste Auslenkung (Peak) um 400 ms nach dem Beginn eines Stimulus auftritt, ist häufig zentro-parietal auf dem Schädel verteilt und wurde in Zeitfenstern zwischen 250 und 500 ms gefunden. Die N400 ist eine der stabilsten (sprachrelevanten) Komponenten und findet sich als typische Reaktion des Gehirns nach Wörtern (auditiv oder visuell) oder anderen bedeutungstragenden Stimuli (Gesichtern, Bildern, Geräuschen, Zeichen oder auch Gerüchen) (Kutas & Federmeier, 2009).

Wie in der Einleitung beschrieben, blickt die EEG/EKP-Forschung auf eine lange Tradition zurück. Es liegt jedoch erst etwas über 30 Jahre zurück, dass Wissenschaftler begannen, spezifische, sprachrelatierte Komponenten mittels Experimenten aus dem EEG herauszulösen. Im Jahre 1980 wurde die N400-Komponente zum ersten Mal als Hirnreaktion auf ein im Satzkontext unerwartetes Wort berichtet (Kutas & Hillyard, 1980a, 1980b; vgl. Abbildung 1). Interessanterweise war das definierte Ziel dieses Experimentes aber nicht, die N400 für ein unerwartetes Wort im Satzkontext zu elizitieren, sondern eine andere Komponente, nämlich die sogenannte P300 (P3b). Diese, wie vorherige Studien gezeigt hatten, wird induziert, wenn Versuchspersonen unerwartete (aber nicht sprachliche) Stimuli präsentiert wurden (z. B. Steven & Robert, 1978; Kutas & Donchin, 1978; Donchin et al., 1978).⁴

⁴ Zur Diskussion der P3b vgl. Abschnitt 3.3.

Die P300 (P3b) ist eine Komponente, die eine zentro-parietale Verteilung aufweist und in Zeitfenstern zwischen 300 bis 800 ms gefunden wurde. Ihre Amplitude vergrößert sich, wenn ein Reiz, welcher verarbeitet bzw. erwartet wird, weniger wahrscheinlich ist (van Herten et al., 2005; Kutas & Hillyard, 1983).

In ihrer Studie (Kutas & Hillyard, 1980) wurden Versuchspersonen geschriebene Sätze wie in 1–3 präsentiert.

1. He returned the book to the **library**.
Er brachte das Buch zu der Bücherei
2. I take coffee with cream and **dog**.
Ich nehme den Kaffee mit Sahne und Hund
3. She put on her high-heeled **SHOES**.
Sie zog ihre SCHUHE mit den hohen Absätzen an

(Die kritischen Wörter sind nur der besseren Lesbarkeit und für ein besseres Verständnis des Versuchsaufbaus fett gedruckt.)

Relevant an diesem Ergebnis ist, dass auf dem letzten Wort in Sätzen wie (2) im Vergleich zu dem letzten, erwarteten Wort in Sätzen wie (1) eine starke Negativierung (N400) gefunden wurde. Ebenso konnten die Autoren aber auch zeigen, dass für erwartete Wörter, die in Großbuchstaben präsentiert wurde (**SHOES**) eine P300 evoziert wurde. Dieses Ergebnis belegt, dass die Negativierung (N400) auf dem letzten Wort (2) nicht nur durch einen unerwarteten Reiz hervorgerufen wurde, sondern für die Einbettung eines Wortes in den semantischen (Satz) Kontext von Bedeutung ist. Diese Ergebnisse werden als Evidenz dafür gewertet, dass die N400 mit semantischen Verarbeitungsprozessen in Verbindung steht.

Durch weitere Studien (Kutas, Lindamood & Hillyard, 1984) derselben Autoren stellte sich heraus, dass die Amplitude (Auslenkung) der N400 mit der Stärke der durch den vorherigen Kontext erzeugten Erwartung eines Wortes (Cloze Probability) korrelierte. Dieser Effekt ist unabhängig davon, ob eine semantische Anomalie induziert wurde oder nicht. Sätze (4–6) unterscheiden sich in ihrer Cloze Probability bezüglich des letzten Nomens.

4. Der Ritter in der schimmernden Rüstung zog sein **Schwert**.
5. Der Ritter in der schimmernden Rüstung zog sein **Taschentuch**.
6. Der Ritter in der schimmernden Rüstung zog sein **Handy**.

Die Amplitude der N400 vergrößert sich, je unerwarteter ein Wort ist, obgleich alle Satzvarianten (4–6) semantisch möglich sind. So zeigt sich auf dem Nomen *Taschentuch* in (5) eine größere N400 Amplitude als auf dem Nomen *Schwert* in (4). Die größte Auslenkung der N400 Amplitude wurde auf *Handy* (6) gemessen.

Weitere Studien belegen, dass die N400 nicht (nur) als ein Effekt einer Erwartung interpretierbar ist (Fischler et al., 1983; vgl. Kounios & Holcomb, 1992 bezüglich Quantifizierung; siehe auch Hagoort et al., 2004).

7. Ein Rabe ist ein **Fahrzeug**.
8. Ein Rabe ist kein **Fahrzeug**.
9. Ein Rabe ist ein **Vogel**.
10. Ein Rabe ist kein **Vogel**.

Die Analyse der EKPs zeigte, dass auf dem satzfinalen Wort in Sätzen wie (7) und (8) ein stärkerer N400 Effekt vorhanden war, als in den Vergleichstrukturen (9) und (10). Interessanterweise war die N400 unabhängig vom Wahrheitswert der Aussage (9 im Vergleich zu 10). Das Konzept der Cloze Probability ist hier nicht anwendbar, da die Wissenschaftler nur eine N400 für (10) nicht aber für (9) nachweisen konnten (ein Satzfragment wie *Ein Rabe ist ein ...* begünstigt die Erwartung auf ein Wort wie *Vogel*, ein Satzfragment wie *Ein Rabe ist kein ...* jedoch nicht). Vielmehr weisen die Daten darauf hin, dass die gefundenen N400 Effekte eine unterschiedlich starke semantische Assoziation zwischen den Nomina der Versuchs-Sätze belegen (Rabe-Vogel im Vergleich zu Rabe-Fahrzeug). Das Ergebnis kann also eher so interpretiert werden, dass die N400 die Verarbeitungsschwierigkeiten bei der Aktivierung eines lexikalischen Eintrages widerspiegelt (lexikalische Zugriffshypothese; vgl. Kutas & Petten, 1994; Kutas et al., 2006). Insofern aktiviert ein (Satz)Kontext semantische Merkmale und erleichtert so die Verarbeitung von möglichen Kandidaten, die nach Cloze Probability oder wahrheitsfunktional mit dem Zielwort übereinstimmen. Kutas & Federmeier (2000) fanden weiterhin, dass eine semantische Voraktivierung durch den Kontext die N400-Amplitude verringerte.

3.1.2 Einfluss von Kontextinformation

In den Abschnitten zuvor wurde beschrieben, wie N400-Effekte auf der Einzelsatzebene ausgelöst werden können. Es gibt jedoch auch Evidenz dafür, dass die N400 sensibel für Informationen aus dem weiteren Kontext (d. h. mehr als ein Satz) ist. Dies wird als Beleg für eine inkrementelle Verarbeitung gedeutet: Der Verarbeitungsapparat nutzt auch pragmatische Information sehr direkt, um Strukturen/Texte zu verarbeiten.

In einer frühen Studie (George, Mannes & Hoffman, 1994), die den Einfluss von Kontext zum Gegenstand hatte, wurden einer Probandengruppe Texte präsentiert, die erst einen Sinn ergaben, wenn sie durch eine Überschrift dis-

ambiguiert wurden.⁵ Hier wurde nicht, wie in den zuvor beschriebenen Experimenten, auf einer kritischen Region gemessen, sondern die abgeleiteten EKPs wurden über die gesamten Texte verglichen. Hierbei wurden Texte mit Überschrift mit Texten ohne Überschrift verglichen. Es zeigte sich auf jedem einzelnen Wort, eine deutlich stärkere Auslenkung der N400 Amplitude für die Texte ohne Überschrift als für die Texte mit Überschrift. Dies deutet darauf hin, dass die N400 nicht nur ein Marker für semantische Integration auf der Einzelsatzebene ist, sondern auch die Integration von Informationen auf der globalen Textebene widerspiegelt (George, Mannes & Hoffman, 1997; George, Kutas, Martinez & Sereno, 1999).

In anderen Studien konnte dieses Ergebnis, dass die N400 nicht nur ein Marker für semantische Verarbeitungsprozesse ist, bestätigt werden. In Nieuwland & Van Berkum (2006), beispielsweise, wurde der Einfluss von pragmatischer Kontextinformation auf die N400 Amplitude untersucht. Dieser EKP-Studie lag die Idee zu Grunde, dass eine semantische Verletzung, die sich in einer N400 widerspiegelt, durch kontinuierlich anwachsende Kontextinformation überschrieben werden kann oder sogar der N400 Effekt umgekehrt werden kann.

Die Forscher präsentierten Probanden comic-artige Kontexte, zum Beispiel eine, Geschichte in der sich eine Erdnuss in eine Frau verliebt. In der realen Welt stellt dies natürlich eine semantische Verletzung dar, da Erdnüsse nicht lieben können. Der Kontext war aber so gestaltet, dass das Verliebt-Sein der Erdnuss im Verlauf der Geschichte möglich bzw. immer akzeptabler wurde. Am Ende der Geschichte stand ein Satz der entweder das Gesalzen-Sein oder das Verliebt-Sein der Erdnuss ausdrückte. Die Analyse der EKPs (gemessen auf den kritischen Wörtern *gesalzen* versus *verliebt*) zeigen, dass *gesalzen* eine größere N400 im Vergleich zu *verliebt* induzierte. Dieses Ergebnis legt den Schluss nahe, dass Kontextinformation antizipiert wird und in der Folge semantische Anomalien sogar überschreiben kann.

Eine weitere Studie belegt, dass Kontextinformation eine Animatheitsverletzung, welche einen N400-Effekt hervorruft, im Verlauf einer Geschichte abschwächen kann (Reduktion der N400 Amplitude): Nieuwland & Van Berkum (2006) konstruierten kleine Geschichten, in denen z. B. ein Segler zu einem Psychiater geht und ihm dort sein Leid klagt. In einer weiteren Bedingung wurde die Geschichte dahingehend verändert, dass das Wort *Segler* durch das unbelebte

⁵ Die Texte bestanden aus unzusammenhängenden, semantisch vagen oder geradezu inkohärenten Sätzen. Sobald Probanden jedoch wussten, um was es in einem Text geht (z. B. Überschrift: „Verfahren zum Backen von Brot“), konnten die einzelnen, zuvor unzusammenhängenden Sätze in einen Kontext (Diskursrepräsentation) integriert werden.

Wort *Jacht* ersetzt wurde. In dieser Weise konnten nun über den Verlauf der Geschichte an verschiedenen Punkten die EKPs von *Segler* versus *Jacht* verglichen werden. Die Hypothese dieses Versuchsaufbaus war, dass das erste Auftreten des Wortes *Jacht* einen N400 Effekt induzieren sollte (Animatheitsverletzung). Versuchspersonen sollten jedoch, wenn sie der Geschichte weiter folgten, der Anomalie *Jacht* immer mehr Belebtheitseigenschaften zuweisen. Die Ergebnisse dieser EKP-Studie bestätigten die Annahmen der Forscher. Auf dem ersten Messpunkt (erste Präsentation) zeigte sich ein starker N400-Effekt (‘Jacht’ versus ‘Segler’). Ebenso konnte eine Reduktion in der N400 Amplitude nachgewiesen werden je später *Jacht* in der Geschichte präsentiert wurde.

Die beschriebenen Studien zeigen zum einen, dass der Parser Informationen inkrementell nutzt und zum Anderen dass Kontextinformationen die Verarbeitung von Anomalien stark beeinflussen bzw. EKP-Effekte abschwächen oder sogar die ‘Reaktion’ des Verarbeitungsapparates umkehren kann.

3.2 Morphosyntaktische Prozesse ((E)LAN, LAN und die P600)

Zwei Komponenten bzw. Komponentengruppen werden häufig mit morphosyntaktischer Verarbeitung in Verbindung gebracht. Hier ist zunächst die ELAN (early left anterior negativity) zu nennen. Diese sehr frühe Komponente hat eine maximale Ausprägung zwischen 150 und 300 ms über den linken aber auch den bilateralen anterioren Bereichen.

Die ELAN wird als ein Hinweis für Wortkategorieverletzungen bzw. Phrasenstrukturverletzungen interpretiert (Friederici, 1995, 1998, 2002). Man bringt sie in Verbindung mit initialen (automatischen) Strukturbildungsprozessen und sie wird häufig induziert wenn der syntaktische Kontext ein Wort einer bestimmten Kategorie erfordert aber ein Wort einer anderen Kategorie eingelesen wird.

Ein Beispiel für eine solche Wortkategorieverletzung ist in Satz (11) zu sehen: Nach der Präposition *im* kann nur ein Adjektiv oder ein Substantiv folgen (Phrasenstrukturaufbau), um die Präpositionalphrase zu vervollständigen aber kein Partizip. Friederici und Kollegen fanden in mehreren Studien Evidenz dafür, dass eine solche Verletzung bei auditiver Präsentation eine ELAN auf dem Partizip hervorruft, gefolgt von einer P600 (siehe weiter unten), die als Reanalyseprozess oder Reparaturprozess interpretiert werden kann.

11. *Der Freund wurde im **besucht**.
12. Der Freund wurde im Hotel **besucht**.

Interessant ist, dass die Latenz der ELAN von unterschiedlichen Darbietungsparametern abhängig ist. So konnten z. B. Gunter et al. (1999) zeigen, dass sich die Latenz der ELAN bei visueller Präsentation vergrößerte.

Die Interpretation der ELAN als ein Marker für einen initialen und automatischen Phrasenstrukturaufbau ist nicht unumstritten, da z. B. das Element vor dem kritischen Wort (Partizip) unterschiedlich ist, was einen Einfluss auf die EKPs haben kann. Um dieses Manko auszugleichen, wurden die Baselines der EKPs in die kritische Region gelegt (100 ms nach der Präsentation des Stimulus, siehe Abschnitt 1). Eine Kritik an der ELAN bzw. der Interpretation der ELAN findet sich z. B. in (Osterhout et al., 2004).

Die LAN (left anterior negativity) wird häufig mit morphosyntaktischen Verarbeitungsprozessen in Verbindung gebracht. Diese frontale Negativierung zeichnet sich durch eine bilaterale meist aber etwas größere Ausprägung über der linken Hemisphäre aus. Die Latenz liegt zwischen 300 und 500 ms.

Die LAN wurde bei Verletzungen wie z. B. unpassender Numerus-, Kasus-, Genus- und Tempus-Markierung aber auch bei Pseudowortsätzen und sogar bei völlig grammatischen Strukturen gefunden (Hagoort & Brown, 2000; King & Kutas, 1995; Münte, Matzke & Johannes, 1997). Einige Wissenschaftler haben vorgeschlagen, dass die LAN auch auf höhere Arbeitsgedächtnisbelastung zurückzuführen ist, wie z. B. wenn ein passendes Subjekt für ein Verb identifiziert wird (Osterhout & Holcomb, 1992; Vos, Gunter, Kolk & Mulder, 2001) oder Anaphern-Antezedenz Relationen (Klunder & Kutas, 1993; van Berkum, Brown & Hagoort, 1999; van Berkum, Brown & Peter Hagoort, 2003; Coulson, King & Kutas, 1998).

Die letzte zu beschreibende Komponente, oder besser gesagt, Komponentenkomplex, ist die P600. Es handelt sich hierbei um eine häufig zentro-parietal auftretende Komponente mit maximaler Auslenkung zwischen 600 und 1000 ms. Sie wurde in der EKP-Literatur im Rahmen der Untersuchung von Garden-Path-Sätzen (Holzwegsätzen) berichtet (Osterhout & Holcomb, 1992). Garden-Path-Sätze sind Sätze, die zwei Lesarten erlauben, das heißt, die (zumindest temporär) ambig sind. Ein Beispiel für einen Holzwegsatz ist Satz (13): Das *persuaded* kann einerseits als transitives Verb (in Past Tense) gebraucht werden und so ein direktes Objekt verlangen oder es kann sich um die Partizipform eines reduzierten Relativsatzes handeln. In diesem Fall kann nur ein Infinitivkomplement folgen. Wird *die falsche Lesart verfolgt (also die transitive), geraten die Leser auf den Holzweg, was sie bemerken, wenn sie den Satz weiter lesen (da kein direktes Objekt erscheint)*.

Den Parsingstrategien *Minimal Attachment* und *Late Closure* folgend (Frazier, 1978; Frazier, 1987; auch Frazier & Clifton, 1996), sollte der Parser einen ökonomischen initialen Strukturaufbau verfolgen, was bedeutet, dass in (13) die Past

Tense Lesart bevorzugt wird, da die Lesart des reduzierten Relativsatzes komplexer ist bzw. als komplexer angenommen wird. Der Parser erwartet ein direktes Objekt als Komplement des Verbs. Osterhout und Holcomb fanden in Strukturen wie (13) eine P600 auf dem disambiguierenden Wort *to*. Sie interpretierten dies als einen Reanalyseeffekt, da der präferierte Strukturaufbau aufgegeben wird und eine neue Analyse und ein neuer Strukturaufbau verfolgt werden muss.

13. The broker *persuaded to* sell the stock.

14. The broker *hoped to* sell the stock.

Untersuchungen zu syntaktisch korrekten aber nicht-präferierten Strukturen (Objektrelativsatz (15)) konnten in Strukturen wie (15) im Vergleich zu (16) auf dem Auxiliar ebenso eine Positivierung zeigen (Mecklinger, Schriefers, Steinhauer & Friederici, 1995).

15. Das sind die Lehrerinnen, die die Schülerin gesehen **hat**.

16. Das sind die Lehrerinnen, die die Schülerin gesehen **haben**.

Die P600 wird als ein sprachspezifischer (syntaktischer) Reanalyse- oder Reparaturmechanismus von Strukturen, die sich als falsch herausstellen, aufgefasst. Ein anderes Beispiel für einen Reanalyseprozess zeigt sich in Sätzen wie (17): Zunächst verfolgt der Parser die präferierte Subjekt-Erst-Abfolge wird dann aber auf der disambiguierenden zweiten NP zu einer Reanalyse veranlasst, die sich in einer P600 widerspiegelt (Frisch, Schlesewsky, Saddy & Alpermann, 2002; beim Graben et al., 2000).

17. Die Detektivin hatte **der Kommissar** gesehen und...

18. Die Detektivin hatte **den Kommissar** gesehen und...

Interessanterweise, konnten Frisch et al. auch eine P600 auf der ambigen ersten NP in Sätzen wie in (19) gegenüber einer nicht ambigen ersten NP in (20) nachweisen.

19. **Die Detektivin** hatte den Kommissar/der Kommissar gesehen und...

20. **Der Detektiv/Den Detektiv** hatte die Kommissarin gesehen und...

Da auf der ersten NP noch keine (syntaktische) Reanalyseprozesse ausgelöst worden sein können, deuten Frisch et al. die beobachtete P600 auch als ein Maß (syntaktischer) Verarbeitungskomplexität ambiger syntaktischer Sätze oder aber auch als einen Hinweis auf paralleles Parsen (Der Verarbeitungsapparat verfolgt zwei mögliche Analysen der Struktur.).

Auch andere syntaktische Verletzungen induzieren eine P600 wie z. B. Phrasenstrukturverletzungen, Subkategorisierungsverletzungen und morphosyntaktische Verletzungen bei Subjekt-Verb-Kongruenz (Münste, Matzke & Johannes,

1997), die oft auch in Kombination mit einer vorhergehenden Negativierung (siehe oben) auftreten. Es konnte ebenso gezeigt werden, dass die P600 als ein Marker für erhöhte syntaktische Komplexität elizitiert wurde (z. B. Friederici, Hahne & Saddy, 2002; Kaan, Harris, Gibson & Holcomb, 2000). Andere Studien berichten Positivierungen, die mit der Verarbeitung von strukturellem Fokus bzw. Fokusintegration oder mit Informationsverarbeitung in Verbindung stehen (Bornkessel, Schlesewsky & Friederici, 2003; Cowles, 2003; Cowles et al., 2007; Stolterfoht & Bader, 2004; Stolterfoht, Friederici, Alter & Steube, 2007; Drenhaus, Zimmermann & Vasishth, 2011).

3.3 Semantische/pragmatische Prozesse P600 und P3b

Wie in Abschnitt 3.2. angesprochen, zeigen die Ergebnisse zur P600, dass es sich hierbei nicht um eine Komponente handelt, die ausschließlich bei morphosyntaktischen Verletzungen gefunden wird. Die mehr oder weniger klassische Ansicht, dass sich spezifische Marker für rein semantische bzw. rein syntaktische Verarbeitung elizitieren lassen, ist durch neuere Ergebnisse in Frage gestellt worden. Es scheint eher so zu sein, dass es sich bei der P600 um einen Komponentenkomplex handelt.

Neuere Studien haben gezeigt, dass auch semantische Anomalien eine P600 induzieren können. So belegt eine EKP-Studie zum Niederländischen (van Herten, Kolk & Chwilla, 2005), dass nicht-kanonische reversible Sätze wie (21) im Gegensatz zu kanonischen in (22) eine P600 hervorrufen.

21. *De kat die voor de muizen **vluchtte** rende door de kamer
(Die Katze, die vor der Maus flüchtete, rannte durch das Zimmer)
22. De muizen die voor de kat **vluchtten** renderen door de kamer.
(Die Maus, die vor der Katze flüchtete, rannte durch das Zimmer)

Die Autoren interpretieren ihr Ergebnis in der Art, dass durch eine Plausibilitäts-Strategie den Sätzen eine kanonische Konstituentenabfolge zugewiesen wird, die bei der Verarbeitung des Verbs zurückgewiesen wird. Van Herten et al. (2005) argumentieren, dass es sich dabei nicht um einen semantisch-syntaktischen Reanalyseprozess handelt, in dem eine Neuverteilung der thematischen Rollen stattfindet. Vielmehr handele es sich um einen generellen Monitoring-Prozess, der durch einen Konflikt zwischen zwei möglichen Interpretationen erzeugt wird. Die P600 Komponente erhält so eine weitere Interpretation(smöglichkeit): Sie signalisiert einen kognitiven Kontrollprozess (Fehlermonitoring), dessen Funktion es ist, den Diskurs konsistent zu halten, das heißt, es ist ein Marker für die Verarbeitung von Pragmatik (Kolk, Chwilla, van Herten & Oor, 2003).

Bei Coulson et al. (1998) und Gunter et al. (1997) findet sich eine nicht sprach-spezifische Interpretation der P600. Hier wird die rein syntaktische Natur der P600 hinterfragt. In diesen Studien wird die P600 als Mitglied der so genannten P300-Familie interpretiert (vgl. Abschnitt 3.1). Bei der P300 handelt es sich um einen Komplex positiver Komponenten, die durch unerwartete Stimuli ausgelöst werden. Die Amplitude der P300 (P3b) ist dabei umgekehrt proportional zur Auftretenswahrscheinlichkeit als auch dem Informationsgehalts des auslösenden Stimulus (je unerwarteter und unwahrscheinlicher, informativer und aufgaben-relevanter ein Reiz ist, um so mehr vergrößert sich die Amplitude der P3b (Donchin, 1981; Donchin & Coles, 1988; Polich, 2007)).

Die Variation der P3b, wie auch die der anderen Vertreter der P300-Familie, ist nicht abhängig von den Eigenschaften eines Reizes, sondern ist vielmehr ein Indiz für subjektiv wahrgenommene Eigenschaften, wie z. B. Salienz, Wahr-scheinlichkeit oder Aufgabenrelevanz. Sie reflektiert somit keine rein sensorische Reaktion, sondern spiegelt kognitive Aspekte der (allgemeinen) Verarbeitung wider. Donchin & Coles (1988) beschreiben die P3b und den mit ihr verbundenen Prozess in ihrem „Kontext-Aktualisierungs-Modell“ als die Aktualisierung eines mentalen Modells, welches während der Verarbeitung von Reizen erstellt wurde.

Ein weiterer Kritikpunkt, die P600 als eine rein syntaktische Komponente zu interpretieren, zeigt sich darin, dass P600 und P3b ähnliche Eigenschaften aufweisen: Zum einen haben sie eine ähnliche Topographie, zum anderen belegen Studien, dass die P600-Amplitude ebenso sensibel gegenüber der Salienz und der Auftretenswahrscheinlichkeit einer syntaktischen Verletzung ist wie die P3b (Coul-son, King & Kutas, 1998; Gunter, Stowe & Mulder, 1997). Generell würde dies darauf hindeuten, dass die P600 als eine allgemeine kognitive Komponente inter-pretiert werden müsste. Eine syntaktische Verletzung/Anomalie wäre dann eine Art Überraschungseffekt, der bei der Verarbeitung beobachtet werden kann. (vgl. aber Osterhout, McKinnon, Bersick & Corey, 1996). Generell zeigen die beschriebenen Studien, dass Evidenz existiert, die gegen eine rein syntaxspezifische Interpretation der P600 spricht bzw. dass diese Interpretation der P600 zu eng gefasst ist. Nichts-destoweniger ist die P600-Komponente ein wichtiger Marker für syntaktische Verarbeitungsprozesse.

4 Einige EKP-Ergebnisse zu negativ polaren Elementen

Im Folgenden sollen mehrere EKP-Studien vorgestellt werden, die die Verarbei-tung von Polaritätskonstruktionen zum Gegenstand haben (s. beim Graben et al.,

2012: in diesem Band). Für die Interpretation der Ergebnisse sind die zuvor diskutierten N400-Komponente und P600-Komponente relevant. Ebenso wird gezeigt werden, dass ein Analyseverfahren, wie die Symbolische Resonanz-Analyse (SRA: beim Graben et al., 2005; Frisch & beim Graben, 2005; beim Graben et al., 2007) im Vergleich zur ‚klassischen‘ Mittelungstechnik die Möglichkeit bietet, tiefer in Komponenten hineinzusehen, das heißt, sie in ihre Teile zu zerlegen.

Die Grammatikalität einer Polaritätskonstruktion ist zum einen davon abhängig,⁶ ob ein passender Lizensierer vorhanden ist und zum anderen davon, ob dieser Lizensierer (strukturell) zugänglich ist.

23. Kein Mann war jemals glücklich. (negative Polarität)
24. *Ein Mann war jemals glücklich. (negative Polarität)
25. *Kein Mann war durchaus glücklich. (positive Polarität)
26. Ein Mann war durchaus glücklich. (positive Polarität)

Bedingung (24) ist ungrammatisch, da ein passendes Lizensierungselement (*kein*) nicht vorhanden ist. Für negative Polaritätselemente gilt, dass die relevanten semantischen Bedingungen – wie abnehmende Monotonizität, Anti-Additivität und Veridizität (z. B. Giannakidou, 1998; Horn, 1989, 1997; Krifka, 1992, 1995; Ladusaw, 1980; Linebarger, 1987) – vorhanden und zugänglich sein müssen, wobei Zugänglichkeit durch das hierarchische bzw. strukturelle Kriterium des c-Kommandos definiert ist (z. B. die klassischen Arbeiten von Klima, 1964; Linebarger, 1987). Bei Nichtzugänglichkeit des Lizensierers ist die Konstruktion ungrammatisch.

Wird auf der anderen Seite ein positives Polaritätselement in einen Kontext gestellt, welcher ein negatives Polaritätselement lizensiert, ist die Konstruktion ebenfalls ungrammatisch bzw. nicht wohlgeformt (25). Diese Beschreibung zeigt, dass die Lizensierung (bzw. Antilizensierung) von Polaritätselementen sowohl semantischen als auch syntaktischen Prinzipien folgt.

Aus der Perspektive der Psycholinguistik stellt sich zum einen die Frage, welche Verarbeitungsmuster auftreten, wenn Lizensierungsbedingungen nicht erfüllt sind. Aus der theoretischen Beschreibung der Anforderungen, die in der theoretischen Linguistik für Polaritätskonstruktionen definiert wurden, ergibt sich aus psycholinguistischer Sicht die Vorhersage, dass bei der Online-Verarbeitung von ungrammatischen Polaritätskonstruktionen eine N400 Komponente für die semantische Verarbeitung (Integration) als auch eine P600 Komponente für die strukturabhängige Analyse induziert werden sollte (vgl. Abschnitte 3.1 zur N400 und Abschnitt 3.2 zur P600).

⁶ In dieser Darstellung wird nur der Lizensierungskontext mit Negation betrachtet werden. Andere mögliche Kontexte, die negativ-polare Elemente lizensieren sind z. B. Fragekontexte, Konditionale.

Um diese Vorhersagen zu überprüfen, wurden von Saddy, Drenhaus, & Frisch (2004) Strukturen wie (27) bis (30) in einem EKP-Experiment getestet.

27. Kein Mann, der einen Bart hatte, war jemals glücklich.
28. *Ein Mann, der einen Bart hatte, war jemals glücklich.
29. *Kein Mann, der einen Bart hatte, war durchaus glücklich.
30. Ein Mann, der einen Bart hatte, war durchaus glücklich.

In den behavioralen Daten zeigten sich längere Reaktionszeiten und höhere Fehlerraten für die ungrammatischen Konstruktionen (28 und 29) im Vergleich zu den grammatischen Bedingungen. In den EKPs wurde für die ungrammatischen negativen Polaritätskonstruktionen (28) eine N400 gefunden. Es zeigte sich jedoch kein P600-Effekt, was aufgrund der strukturellen Abhängigkeit von Lizensierer und negativem Polaritätselement und aufgrund der theoretischen Annahme (c-Kommando) nicht vorhergesagt worden war. Es wurde zwar ein Trend für eine Positivierung berichtet, dieser jedoch war nicht signifikant.

Die positiv-polaren Strukturen brachten ein biphasisches N400/P600-Muster für die ungrammatische Struktur (29) im Vergleich zur grammatischen Struktur (30) hervor. In ihrem Papier argumentierten Saddy et al. (2004), dass die Unterschiede in den Verletzungsbedingungen von negativ- und positiv-polaren Elementen auf unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen zurückzuführen sind. Die induzierte P600 spiegelt die erhöhte Verarbeitungskomplexität (z. B. Friederici, Hahne & Saddy, 2002; Kaan, Harris, Gibson & Holcomb, 2000) wider, die auf den (zusätzlichen) negativen Operator zurückzuführen ist. Des Weiteren interpretierten die Autoren die gefundene N400 und das Ausbleiben einer P600 als Indiz dafür, dass bei der Verarbeitung von negativ-polaren Elementen hauptsächlich semantische Prozesse involviert sind.

In einer Anschlussstudie (Drenhaus, Saddy & Frisch, 2005) sollte überprüft werden, welchen Einfluss ein Lizensierer, der dem negativ polaren Element vorangeht, jedoch strukturell nicht zugänglich ist (nicht c-kommandiert wird (33)), auf den Verarbeitungsprozess hat, bzw. welche Effekte induziert werden. Folgend den Annahmen der linguistischen Literatur (c-Kommando) sollten keine Unterschiede zwischen (32) und (33) hinsichtlich der behavioralen Daten (Reaktionszeit und Akkuratheit) als auch in den EKPs zu erwarten sein, da eine Negation im Relativsatz (33) keinen Einfluss auf die Unakzeptabilität von *jemals* haben sollte (die Negation c-kommandiert das negativ polare Element nicht). Hierfür wurden Studien sowohl mit beschleunigten Akzeptabilitätsurteilen als auch mit EKPs durchgeführt.

31. Kein Mann, der einen Bart hatte, war jemals glücklich.
32. *Ein Mann, der einen Bart hatte, war jemals glücklich.
33. *Ein Mann, der keinen Bart hatte, war jemals glücklich.

Die Analyse der beschleunigten Akzeptabilitätsurteile zeigte jedoch, dass Unterschiede zwischen den ungrammatischen Bedingungen (32 und 33) nachgewiesen werden konnten. Probanden zeigten geringere Akkuratheiten als auch längere Reaktionszeiten für Bedingung (33), in der die Negation für das negativ polare Element unzugänglich ist (70 %; 712 ms), im Vergleich zu Bedingung (32), in der keine Negation vorhanden ist (83 %, 554 ms). Drenhaus et al. (2005) interpretierten dies als einen Interferenzeffekt, der durch die linear vorangehende jedoch nicht c-kommandierende Negation hervorgerufen wird – das negativ polare Element stört den Verarbeitungsprozess und lizenziert fälschlicherweise das negative polare Element. In der darauffolgenden EKP-Studie, die ähnliche Stimuli benutzte, konnte dieses Ergebnis erhärtet werden (Drenhaus et al., 2005).

Die EKPs in Abbildung 3 zeigen, dass die ungrammatischen Bedingungen (32 und 33) im Vergleich zur grammatischen Bedingung (31) ein deutliches

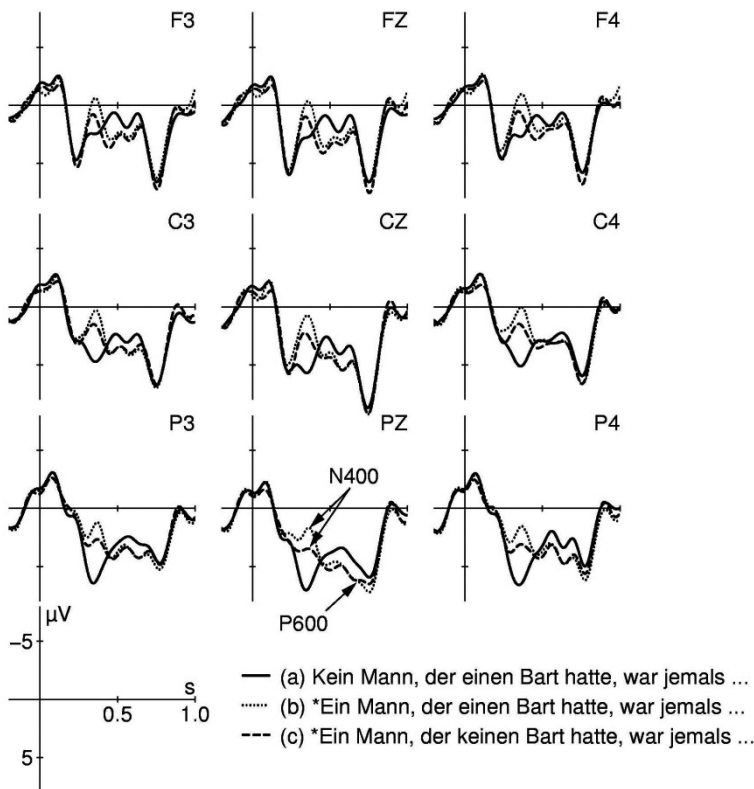


Abbildung 3: EKP-Effekte auf dem negativ polaren Element „jemals“ (von Beginn der Präsentation bis 1000 ms danach) für eine Untermenge von 9 Elektroden (aus Drenhaus et al., 2005).

N400/P600-Muster induzieren. Die EKPs spiegeln zum einen den Verarbeitungsaufwand, den eine semantische Integration (N400) hervorruft, wider, und zum anderen den Versuch des Verarbeitungssystems die Struktur syntaktisch zu reparieren bzw. zu reanalysieren (P600).

Ebenso zeigen die EKPs eine Modulation im N400 Zeitfenster (32 im Vergleich zu 33). Die Amplitude der N400 ist signifikant reduziert in Bedingung (33) im Vergleich zu Bedingung (32). Dies deutet darauf hin, dass die Integration des negativ polaren Elementes weniger Verarbeitungskosten (Integration) verlangt, wenn ein Lizensierer dem *jemals* zwar vorweg geht (33), aber aufgrund von strukturellen Bedingungen nicht zugänglich ist (der Parser hat die Möglichkeit ein passendes Ziel für die Lizenzierung zu finden und eine mögliche Analyse einzuleiten). In Strukturen wie (32) ist diese Möglichkeit nicht gegeben, da kein Lizensierer vorhanden ist. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass zumindest aus der Perspektive der Sprachverarbeitung die c-Kommando-Relation zwischen Lizensierer und negativ polarem Element einen deutlich schwächeren Status hat, als von der theoretischen Linguistik vorhergesagt wird. Des Weiteren zeigen die EKPs dieser Studie, dass die P600 Effekte sich in den Bedingungen (32) und (33) nicht unterscheiden. Ebenso kann dieses Ergebnis dahingehend interpretiert werden, dass die Negation im Relativsatz den Prozess der Reparatur für syntaktisch ungrammatische Strukturen nicht beeinflusst.

Hier stehen wir nun vor einem Dilemma. Anscheinend stehen die Ergebnisse der beiden Studien im Widerspruch zueinander: Die Daten aus der Studie von Saddy et al. (2004) zeigen, dass keine P600 induziert wird, wenn kein Lizensierer präsent ist. Die Daten von Drenhaus et al. (2005) geben aber Evidenz dafür, dass auf dem Element *jemals* Reparaturkosten oder auch Reanalysekosten beim Verarbeiten ungrammatischer negativ polarer Strukturen induziert werden. Dieser Widerspruch einer nicht-elizitierten bzw. elizitierten P600-Komponente ist besonders bemerkenswert, weil das lexikalische Material, welches in beiden Studien verwendet wurde, identisch war und nur um die Bedingung (33) in Drenhaus et al. 2005 erweitert wurde. Eine mögliche Erklärung bietet das in Abschnitt 1 beschriebene Signal-Rauschverhältnis. In der EKP-Literatur/ Forschung wird häufig die Mittelungstechnik verwendet um das Signal-Rauschverhältnis zu verbessern. Die Annahme ist, dass das Grundrauschen durch die Mittelung verschwindet und sich das ereignisgebundene Signal herauschält. Es kann jedoch geschehen, dass auch Informationen herausgefiltert werden, an denen wir interessiert sind. Dies kann z. B. daran liegen, dass sich eine negative und eine positive EKP-Komponente im gleichen Zeitfenster überlagern. Wenn diese Überlagerung konsistent in allen EKP-Epochen auftritt, könnte sie mithilfe der *Independent Component Analysis (ICA)* aufgelöst werden. Tritt die Überlagerung

hingegen inkonsistent in verschiedenen Gruppen von Trials auf, bietet sich die Symbolische Resonanz-Analyse (SRA) an (beim Graben et al., 2007).

Um das oben beschriebene Interpretationsproblem in den beiden Studien (Saddy et al., 2004 und Drenhaus et al., 2005) aufzulösen, haben Drenhaus, beim Graben, Saddy, & Frisch (2006) die Daten in einer post-hoc Analyse mittels SRA (beim Graben et al., 2005; Frisch & beim Graben, 2005; beim Graben et al., 2007) reanalysiert. Während bei Saddy et al. eine N400 aber keine P600 berichtet wurde, induzierten die nichtlizenzierten negativ polaren Elemente bei Drenhaus et al. ein deutliches N400-P600-Muster. Die gefundenen P600 Effekte für die Verletzungsbedingungen im Vergleich zur grammatischen Bedingung unterschieden sich hier jedoch nicht, während ein klarer Interferenzeffekt im N400 Zeitfenster (Modulation der N400) beobachtet wurde. Die Reanalyse der Daten beider Experimente mittels SRA liefert ein einheitlicheres Bild: Der berichtete Trend im P600-Zeitfenster bei Saddy et al. konnte zu einer signifikanten P600 verstärkt werden (Abbildung 4) und die P600 konnte, da sie von einer Negativierung überlagert wurde, aus den Roh-EEG Daten herausgelöst werden.

Der gefundene Effekt zeigte dieselbe Topographie und Morphologie wie in den Daten von Drenhaus et al., was darauf hindeutet, dass in beiden Studien ähnliche Generatoren an der Entstehung des P600 Effekts beteiligt waren. Ebenso zeigt die post-hoc Analyse der Daten von Drenhaus et al., dass sich die beiden Verletzungsbedingungen (32 vs. 33) signifikant in der Amplitude des N400 Effektes wie auch in der Amplitude des P600 Effektes unterschieden.

Die Effekte in der Bedingung (32) waren signifikant stärker ausgeprägt als in der Verletzungsbedingung (33). Desweiteren konnte eine zusätzliche Positivierung für die Verletzungsbedingung (33) im Vergleich zu den Bedingungen (31 und 33) nachgewiesen werden, die in ihrer Latenz vor dem beschriebenen P600 Effekt lag (Abbildung 5).

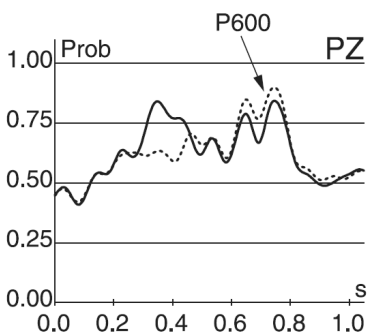


Abbildung 4: SRA-Analyse von Saddy et al. (2004): EKP-Effekte (PZ-Elektrode) auf dem negativ polaren Element „jemals“.

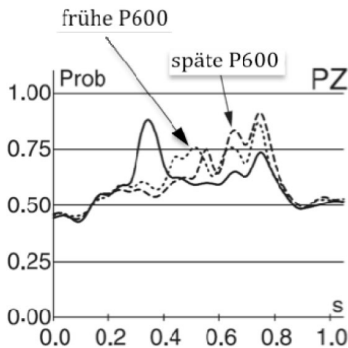


Abbildung 5: SRA-Analyse von Drenhaus et al. (2004, 2005): EKP-Effekte (PZ-Elektrode) auf dem negativ polaren Element „jemals“.

Die Autoren interpretieren diese frühe Positivierung (Friederici et al., 2001; Friederici et al., 1998) als einen Diagnoseprozess (pragmatische P600): Der Parser entdeckt die Möglichkeit einer Reanalyse der nicht korrekten Struktur, da eine Negation im Relativsatz vorhanden ist; somit besteht die Möglichkeit, eine Implikatur zu berechnen und alternative Propositionen zu löschen. Die ERPs der präsentierten Studien zeigen, dass bei der Verarbeitung von negativ polaren Elementen die linguistischen Ebenen Syntax, Semantik und Pragmatik miteinander interagieren. Die Ergebnisse geben Evidenzen, dass die in der Linguistik vorgeschlagenen Beschreibungsansätze zur negativen Polarität, die Lizenzierung mehr oder weniger ausschließlich als ein semantisches, syntaktisches oder rein pragmatisches Phänomen betrachten, durchaus hinterfragbar sind.

5 Fazit

In diesem Übersichtsartikel wurden zum einen die Grundlagen der EEG/EKP-Methodik erläutert und zum anderen ihr Nutzen für die Erforschung von Sprache dargestellt. Es handelt sich zwar bei dieser Methodik um ein sehr aufwändiges Verfahren, dass im Gegensatz zu Offline-Verfahren einen hohen technischen Aufwand als auch einen hohen Zeitaufwand erfordert.

Der Vorteil dieser Methodik ist jedoch, dass die Verarbeitung von Sprache direkt beobachtet und abgebildet werden kann. EKPs liefern Rückschlüsse, wie ein (sprachlicher) Reiz verarbeitet wird, bzw. welchen Einfluss ein Reiz auf das Verarbeitungssystem hat. Mittels der Merkmale Polarität, Latenz, Amplitude und Topographie ist es möglich, Verarbeitungsschritte bzw. Verarbeitungsprobleme einzuordnen und zu klassifizieren.

Der kleine Ausschnitt der hier besprochenen Studien sollte gezeigt haben, dass sich linguistische Ebenen in unterschiedlichen Ausprägungen im EKP nachweisen lassen. Die Erforschung sprachlicher Phänomene mittels EKP geht hier weit über die Verarbeitung von z. B. *nur* Semantik oder *nur* Syntax hinaus, da hier auch die Interaktion der Einzelebenen betrachtet werden kann.

Es sollte aber auch ebenso deutlich geworden sein, dass die besprochenen Komponenten nicht ausschließlich bei der Verarbeitung von Sprache beobachtet werden. Es zeigt sich zwar, dass EKP-Effekte sprachrelatierte Reaktionen des Verarbeitungsapparates sind, aber ebenso, dass der menschliche Verarbeitungsapparat generell auf Anomalien und Reize mit spezifischen EKP-Effekten reagiert, was über die Verarbeitung von Sprachreizen hinausgeht (vgl. N400 und die Diskussion zur P600/P3b).

Die scheinbar widersprüchlichen Ergebnisse bezüglich Komponenten (P600 als rein syntaktischer Verarbeitungsreflex) zeigen, wie auch unterschiedliche Ergebnisse zur N400, dass es sich bei den Komponenten nicht um Einzelkomponenten handelt, sondern um Komponentenkomplexe. Eine Methode, die in diesem Überblicksartikel angesprochen und von den Autoren benutzt wurde, ist die SRA. Es sollte deutlich geworden sein, dass es mittels dieser Methode möglich war, tiefer in die EKPs hineinzublicken und verdeckte Information über die Verarbeitung von Polaritätskonstruktionen herauszulösen.

Danksagung: Wir möchten uns bei den anonymen Gutachtern für Anregungen und Verbesserungshinweise bedanken. Ebenso möchten wir Judith Köhne für Hinweise und Diskussion danken, als auch Stefan Frisch für seine Hilfe, Unterstützung und Diskussion in der „NEG-POL Zeit“.

Literatur

- Bastiaansen, M., & Hagoort, P. (2006). Oscillatory neuronal dynamics during language comprehension. *Progress in brain research*, 159(06), 179–196.
- Bates, D., & Sarkar, D. (2007). lme4: Linear mixed-effects models using S4 classes. R package version 0.9975-11.
- Baayen, R. H. (2008). Analyzing linguistic data: A practical introduction to statistics using R. Cambridge University Press.
- Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 87(1), 527–570.
- van Berkum, J. J. A., Brown, C. M., & Hagoort, P. (1999). Early Referential Context Effects in Sentence Processing: Evidence from Event-Related Brain Potentials. *Journal of Memory and Language*, 182, 147–182.
- van Berkum, J. J. A., Brown, C. M., & Hagoort, P. (2003). Event-related brain potentials reflect discourse- referential ambiguity in spoken language comprehension. *Society*, 40, 235–248.

- Bornkessel, I., Schlesewsky, M., & Friederici, A. D. (2003). Contextual information modulates initial processes of syntactic integration: The role of inter-versus intrasentential predictions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29(5), 871–882.
- Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: an introduction. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind: Event-related potentials and cognition*, New York: Oxford University Press, 1–26.
- Coulson, S., King, J. W., & Kutas, M. (1998). Expect the unexpected: Event-related brain response to morphosyntactic violations. *Language and cognitive processes*, 13(1), 21–58.
- Cowles, H. W. (2003). *Processing information structure: Evidence from comprehension and production*. University of California, San Diego.
- Cowles, H. W., Kluender, R., Kutas, M., & Polinsky, M. (2007). Violations of information structure: an electrophysiological study of answers to wh-questions. *Brain and language*, 102(3), 228–242.
- Donchin, E. (1981). Surprise!... surprise?. *Psychophysiology*, 18(5), 493–513.
- Donchin, E., & Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating?. *Behavioral and Brain Sciences*, 11(3), 357–427.
- Donchin, E., Ritter, W., McCallum, W. C., & others. (1978). Cognitive psychophysiology: The endogenous components of the ERP. *Event-related brain potentials in man*, 349–411.
- Drenhaus, H., beim Graben, P., Saddy, D., & Frisch, S. (2006). Diagnosis and Repair of Negative Polarity Constructions in the Light of Symbolic Resonance Analysis. *Brain and Language*, 255–268.
- Drenhaus, H., Saddy, D., & Frisch, S. (2005). Processing Negative Polarity Items: When Negation Comes Through the Backdoor. In S. Kepser, & M. Reis (Eds.), *Linguistic Evidence: Empirical, Theoretical, and Computational Perspectives*. Berlin: Mouton de Gruyter (Studies in Generative Grammar 85), 145–165.
- Drenhaus, H., Zimmermann, M., & Vasisht, S. (2011). Exhaustiveness effects in clefts are not truth-functional. *Journal of Neurolinguistics*, 24(3), 320–337.
- Fischler, P. A., Bloom, Childers, D. G., Roucos, S. E., & Perry, N. W. (1983). Brain potentials related to stages of sentence verification. *Psychophysiology*, 20, 400–409.
- Frazier, L. (1987). Theories of sentence processing. *Modularity in knowledge representation and natural-language understanding*, 291–307. MIT Press Cambridge, MA.
- Frazier, L. & Clifton, C. (1996). *Construal*. The MIT Press.
- Friederici, A D., Mecklinger, A, Spencer, K. M., Steinhauer, K., & Donchin, E. (2001). Syntactic parsing preferences and their on-line revisions: a spatio-temporal analysis of event-related brain potentials. *Brain research. Cognitive brain research*, 11(2), 305–323.
- Friederici, A D., Steinhauer, K., Mecklinger, A., & Meyer, M. (1998). Working memory constraints on syntactic ambiguity resolution as revealed by electrical brain responses. *Biological psychology*, 47(3), 193–221.
- Friederici, A. D. (1995). The time course of syntactic activation during language processing: A model based on neuropsychological and neurophysiological data. *Brain and Language*, 50, 259–281.
- Friederici, A. D. (1998). The neurobiology of language comprehension. *Language comprehension: A biological perspective*, Springer, 263–301.
- Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(2), 78–84.

- Friederici, A. D., Hahne, A., & Saddy, D. (2002). Distinct neurophysiological patterns reflecting aspects of syntactic complexity and syntactic repair. *Journal of psycholinguistic research*, 31(1), 45–63.
- Frisch, S., & beim Graben, P. (2005). Finding needles in haystacks: Symbolic resonance analysis of event-related potentials unveils different processing demands. *Cognitive brain research*, 24(3), 476–491.
- Frisch, S., Schlesewsky, M., Saddy, D., & Alpermann, A. (2002). The P600 as an indicator of syntactic ambiguity. *Cognition*, 85(3), 83–92.
- George, M. S., Kutas, M., Martinez, A., & Sereno, M. I. (1999). Semantic integration in reading: engagement of the right hemisphere during discourse processing. *Brain: a journal of neurology*, 122(7), 1317–1325.
- George, M. S., Mannes, S., & Hoffman, J. E. (1994). Global semantic expectancy and language comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6(1), 70–83.
- George, M. S., Mannes, S., & Hoffman, J. E. (1997). Individual Differences in Inference Generation: An ERP Analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(6), 776–787.
- beim Graben, P., Drenhaus, H., & Gerth, S. (2012). Computationale Neurolinguistik. *Germanistische Linguistik*, (in diesem Band).
- beim Graben, P., Drenhaus, H., Brehm, E., Rhode, B., Saddy, D., & Frisch, S. (2007). Enhancing dominant modes in nonstationary time series by means of the symbolic resonance analysis. *Chaos*, 17(4): 43106.
- beim Graben, P., Frisch, S., Fink, A., Saddy, D., & Kurths, J. (2005). Topographic voltage and coherence mapping of brain potentials by means of the symbolic resonance analysis. *Physical Review*, 72(5): 51916.
- beim Graben, P., Saddy, J. D., Schlesewsky, M., & Kurths, J. (2000). Symbolic dynamics of event-related brain potentials. *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics*, 62(4), 5518–5541.
- Gries, S. (2012). Modellierung. *Germanistische Linguistik*, (in diesem Band).
- Gunter, T. C., Friederici, A. D., & Hahne, A. (1999). Brain responses during sentence reading: Visual input affects central processes. *NeuroReport*, 10(15), 3175–3178.
- Gunter, T. C., Stowe, L. A., & Mulder, G. (1997). When syntax meets semantics. *Psychophysiology*, 34(6), 660–676.
- Hagoort, P., & Brown, C. M. (2000). ERP effects of listening to speech compared to reading: The P600/SPS to syntactic violations in spoken sentences and rapid serial visual presentation. *Neuropsychologia*, 38(11), 1531–1549.
- Hagoort, P., Hald, L., Bastiaansen, M., & Petersson, K. M. (2004). Integration of word meaning and world knowledge in language comprehension. *Science*, 304(5669), 438–441.
- Hahne, A. (1998). *Charakteristika syntaktischer und semantischer Prozesse bei der auditiven Sprachverarbeitung: Evidenz aus ereigniskorrelierten Potentialstudien*. Max-Planck-Institut of Cognitive Neuroscience.
- Helmholtz, H. (1853). Ueber einige Gesetze der Vertheilung elektrischer Ströme in körperlichen Leitern mit Anwendung auf die thierisch-elektrischen Versuche. *Annalen der Physik*, 165(6), Wiley Online Library, 211–233.
- Herrmann, C. S., Grigutsch, M., & Busch, N. A. (2005). EEG oscillations and wavelet analysis In T. Handy (Ed.) *Event-related potentials: a methods handbook*. Cambridge: MIT Press, 229–259.
- van Herten, M., Kolk, H., & Chwilla, D. (2005). An ERP study of P600 effects elicited by semantic anomalies. *Cognitive Brain Research*, 22(2), 241–255.

- Hink S., A., & Robert, F. (1978). Event-related brain potentials and selective attention to acoustic and phonetic cues. *Biological Psychology*, 6(1), 1–16.
- Horn, L. (1989). *A Natural History of Negation*. Chicago: CSLI.
- Horn, L. (1997). Negative polarity and the dynamics of vertical inference. In D. Forget, P. Hirschbühler, F. Martinon, & M.-L. Rivero (Eds.), *Negation and Polarity: Syntax and Semantics*. Amsterdam: John Benjamins, 157–182.
- Jung, T. P., Makeig, S., Westerfield, M., Townsend, J., Courchesne, E., & Sejnowski, T. J. (2000). Removal of eye activity artifacts from visual event-related potentials in normal and clinical subjects. *Clinical Neurophysiology*, 111(10), 1745–1758.
- Kaan, E., Harris, A., Gibson, E., & Holcomb, P. (2000). The P600 as an index of syntactic integration difficulty. *Integration The Vlsi Journal*, 15(2), 159–201.
- King, J. W., & Kutas, M. (1995). Who Did What and When? Using Word- and Clause-Level ERPs to Monitor Working Memory Usage in Reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7(3), 376–395.
- Klima, E. (1964). Negation in English. In J. A. Fodor & J. Katz (Eds.), *The Structure of Language*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 246–323.
- Kluender, R., & Kutas, M. (1993). Bridging the Gap: Evidence from ERPs on the Processing of Unbounded Dependencies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(2), 196–214.
- Kolk, H., Chwilla, D., van Herten, M., & Oor, P. J. (2003). Structure and limited capacity in verbal working memory: A study with event-related potentials. *Brain and Language*, 85(1), 1–36.
- Kounios, J., & Holcomb, P. J. (1992). Structure and process in semantic memory: Evidence from event-related brain potentials and reaction times. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(4), 459.
- Krifka, M. (1992). Some remarks on polarity items. In D. Zaefferer (Ed.), *Semantic Universals and Universal Semantics*. Berlin: Foris, 150–189.
- Krifka, M. (1995). The semantics and pragmatics of polarity items. *Linguistic Analysis*, 25, 209–257.
- Kutas, M., & Donchin, E. (1978). Variations in the latency of P300 as a function of variations in semantic categorizations. *Multidisciplinary perspectives in event-related brain potential research*, 600, 9–77.
- Kutas, M., & Federmeier, K. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in cognitive sciences*, 4(12), 463–470.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980a). Event-related brain potentials to semantically inappropriate and surprisingly large words. *Biological Psychology*, 11(2), 99–116.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1983). Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory and cognition*, 11(5), 539–550.
- Kutas, M., & Petten, C. K. V. (1994). Psycholinguistics electrified: Event-related brain potential investigations. In M. A. Gernsbacher (Ed.), *Handbook of Psycholinguistics*. San Diego: Academic Press, 83–143.
- Kutas, M., Lindamood, T. E., & Hillyard, S. A. (1984). Word expectancy and event-related potentials during sentence processing. In S. Kornblum & J. Requin (Eds.), *Preparatory Studies and Processes*. Hillsdale (NJ): Erlbaum, 217–237.
- Kutas, M., Van Petten, C., & Kluender, R. (2006). Psycholinguistics electrified II: 1994–2005. *Handbook of psycholinguistics* (2nd ed.), Elsevier Press, New York, 659–724.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980b). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207, 203–205.

- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2009). Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential (ERP). *Annual review of psychology*, 62, 621–647.
- Ladusaw, W. (1980). *Polarity Sensitivity as Inherent Scope Relations*. New York & London: Garland.
- Linebarger, M. (1987). Negative polarity and grammatical representation. *Linguistics and Philosophy*, 10, 325–387.
- Luck, S. J. (2004). Ten Simple Rules for Designing and Interpreting ERP Experiments. In T. C. Handy (Ed.), *Event-Related Potentials: A Methods Handbook*. Cambridge, MA: MIT Press, 17–32.
- Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT-Press, 17–32.
- Makeig, S., Jung, T. P., Bell, A. J., Ghahremani, D., & Sejnowski, T. J. (1997). Blind separation of auditory event-related brain responses into independent components. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(20), 10979.
- Makeig, S.; Debener, S.; Onton, J. & Delorme, A. (2004). Mining event-related brain dynamics. *Trends in Cognitive Science*, 8, 204–210.
- Mecklinger, A., Schriefers, H., Steinhauer, K., & Friederici, A. D. (1995). Processing relative clauses varying on syntactic and semantic dimensions: An analysis with event-related potentials. *Memory and Cognition*, 23, 477–494.
- Münte, T. F., Matzke, M., & Johannes, S. (1997). Brain activity associated with syntactic incongruencies in words and pseudo-words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(3), 318–329.
- Niebeling, H. G. (1980). *Einführung in die Elektroenzephalographie*. Springer-Verlag.
- Nieuwland, M. S., & van Berkum, J. J. A. (2006). When peanuts fall in love: N400 evidence for the power of discourse. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(7), 1098–1111.
- Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31, 785–806.
- Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1995). Event-Related Potentials and Language Comprehension. In M. Rugg & M. Coles (Eds.), *Electrophysiological studies of human cognitive function*. Oxford: Oxford University Press, 171–215.
- Osterhout, L., McKinnon, R., Bersick, M., & Corey, V. (1996). On the language specificity of the brain response to syntactic anomalies: Is the syntactic positive shift a member of the P300 family? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(6), 507–526.
- Osterhout, L., McLaughlin, J., Kim, A., & Greenwald, R. (2004). Sentences in the Brain: Event-Related Potentials as Real-Time Reflections of Sentence Comprehension and Language Learning. *Language*, 271–308.
- Picton, T W, Bertin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., Miller, G. a, et al. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37(2), 127–152.
- Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148.
- Quiroga, R. Q., & Garcia, H. (2003). Single-trial event-related potentials with wavelet denoising. *Clinical Neurophysiology*, 114, 376–390.
- Roehm, D., Schlesewsky, M., Bornkessel, I.; Frisch, S., & Haider, H. (2004). Fractionating language comprehension via frequency characteristics of the human EEG. *NeuroReport*, 15, 409–412.

- Saddy, D., Drenhaus, H., & Frisch, S. (2004). Processing polarity items: Contrastive licensing costs. *Brain and Language*, 90, 495–502.
- Schomer, D. L., & Lopes da Silva, F. (2011). *Niedermeyer's Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. Lippincott Williams&Wilki; 6th Revised edition.
- Sharbrough, F., Chartrian, G. E., Lesser, R. P., Lüders, H., Nuwer, M., & Picton, T. W. (1995). American Electroencephalographic Society guidelines for standard electrode position nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 8, 200–202.
- Stolterfoht, B., & Bader, M. (2004). Focus structure and the processing of word order variations in German. *Information structure: Theoretical and Empirical Aspects*, 259–275.
- Stolterfoht, B., Friederici, A. D., Alter, K., & Steube, A. (2007). Processing focus structure and implicit prosody during reading: Differential ERP effects. *Cognition*, 104(3), 565–590.
- Vasishth, S., & Drenhaus, H. (2011) Locality effects in German. *Dialogue and Discourse*. 2(1), 59–82.
- Vos, S. H., Gunter, T. C., Kolk, H., & Mulder, G. (2001). Working memory constraints on syntactic processing: An electrophysiological investigation. *Psychophysiology*, 38(01), 41–63.
- Zschocke, S. (2002). *Klinische Elektroenzephalographie*. Springer.